

地盤のひずみ軟化特性を考慮した 流動要素法による掘削解析

三井建設
鳥取大学

○ 大原 永次
木山 英郎, 藤村 尚, 西村 強

1. はじめに

地盤掘削を行うと、掘削に伴って解放応力が発生する。発生する応力増分によって応力状態が降伏条件を満足するような状態に至れば局所的な破壊あるいは全体的な大変形が生ずることが考えられる。この防護策として、矢板や切梁などの仮設構造物や山留め壁が施工される。これらを安全に施工するために、地盤の強度特性や地盤-構造物の相互作用を十分考慮して変状を予測しておくことが必要となる。本研究では、ひずみ軟化型弾塑性構成式を流動要素解析(FLEM)に導入し、掘削による地盤の挙動を解析したものである。

2. 解析法の概要

FLEM は、時刻 t での運動方程式を時間増分 Δt について差分近似し、加速度を未知数とした陽な形で近似する逐次解法を用いている。

$$\{M\}\{\ddot{u}\} = \{R\} - \{F\} - \{c\}\{\dot{u}\} \quad (1)$$

ここに、 $\{R\}$: 時刻 t の外力ベクトル、 $\{F\}$: 時刻 $t - \Delta t$ の内部等価節点力ベクトル、 $\{M\}$: 質量マトリックス、 $\{\ddot{u}\}$: 時刻 t の加速度ベクトル、 $\{c\}$: 減衰マトリックス、 $\{\dot{u}\}$: 時刻 $t - \Delta t$ の速度ベクトル

内部の等価節点力 $\{F\}$ は、以下に示す式から求められる。まず、増分ひずみ $\{\Delta \varepsilon\}$ は、変位・ひずみマトリックス $[B]$ と増分変位ベクトル $\{\Delta u\} = \{u\} - \{u\}_{t-\Delta t}$ から次のようになる。

$$\{\Delta \varepsilon\} = [B]\{\Delta u\} \quad (2)$$

本研究では、Drucker-Prager 型降伏条件 $f(\sigma) = I_1/3 + J_2^{1/2}(\cos\theta - \sin\theta \sin\phi/\sqrt{3})$ (I_1 : 応力の第一不変量、 J_2 : 偏差応力の第二不変量) と関連流動則による増分型の構成式を導入している。また、時刻 t において要素内応力が塑性状態に達したとき、次のように定義される係数 R を用いて応力の増分値は $f = 0$ を満足するよう修正する過程を設けている。¹⁾

$$R = (\sigma_e - \sigma_y) / (\sigma_e - \sigma) \quad (3) \quad \Delta' \sigma = (1 - R)\Delta \sigma_e \quad (4)$$

ここに、 σ_e : 応力の弾性成分、 σ_y : 降伏応力。節点力および応力は次のように更新する。

$$\{F\} = \{F\}_{t-\Delta t} + \int_V [B]\{\Delta' \sigma\} d(\text{vol}) \quad (5) \quad \{\sigma\} = \{\sigma\}_{t-\Delta t} + \{\Delta' \sigma\} \quad (6)$$

式(1)より、時刻 t における加速度ベクトルが求まれば、これを時間増分 Δt について積分し、変位増分ベクトル $\{\Delta u\}$ と速度ベクトル $\{\dot{u}\}$ を求め、(1)~(6)により、節点力および応力が更新される。この過程を繰り返せば、与えられた条件のもとでの変形が表現される。また、ひずみ軟化の過程として、降伏曲面を支配するパラメーターの一つである粘着力に注目し、粘着力を劣化させることで降伏局面を収縮することにした。その関係式を次式で与える。

$$c' = f(c, \varepsilon^*) \quad (7)$$

ここに c' は劣化後の粘着力であり、 ε^* は相当塑性ひずみである。相当塑性ひずみを次式で与え、

$$\varepsilon^* = \sqrt{2} \left\{ \varepsilon_{ij} \right\}_p / \sqrt{3} = d\varepsilon_p \quad (8)$$

劣化勾配を支配する粘着力劣化定数 κ を導入して、粘着力の劣化を具体的に次式で表現している。

$$c' = f(c, \varepsilon^*) = c - \kappa \varepsilon^* \quad (9)$$

作成したプログラムを用いて、一軸圧縮解析を実施した例を図1に示す。上記したような計算過程によって、弾塑性挙動を示す材料の応力-ひずみ関係が表現できそうである。

3. 地盤の掘削解析への適用

図1に示すような地盤掘削の問題を例として考える。解析領域として、図2で示すように BC 面を地表面とする高さ 50

m、幅 50 m の地盤を与える。図中の太線 DE は、山留め工をイメージした梁要素であり、地盤部分を示す要素は、4 節点の平面ひずみ要素である。地盤および梁要素の材料定数は、表 1 に示す。図 1 に示す陰影部を地表面から一層 5 m で 4 段階に分けて計 20 m 掘削を行うことを想定した解析を行った。山留め壁に作用する土圧の釣り合いを考慮して掘削完了時の梁要素の根入れ深さは 10 m とした。解析は、Case1: 掘削面が A 点まで達したときに切梁が設置されたとして A 点に固定支承（剛性が無限大）を設けた場合、Case2: Case1 において、根入れ部地盤層（図 2 の斜線部で示している）の剛性が低い ($E=100 \text{ tf/m}^2$) 場合について行う。

4. 解析結果と考察

図 3 は、Case1, 2 での山留め壁の変形図である。ここで、図中の縦軸は、図 2 に示すように山留め壁の下端を原点として上向きに採った h 、横軸は、掘削面の水平変位量 x を山留め壁の初期深さ $H_0=30\text{m}$ で除したものである。図でわかるように、支承は、三次掘削完了後に設けているので、設定時には上部の掘削によって初期変位を生じていることになる。図より、根入れ部層の剛性が低い場合の方が下端部で変形はかなり大きくなっている。また、切梁への作用力を比較すると、根入れ部層の剛性が低い場合 27.9(tf)、全層の剛性が均一の場合 9.8(tf) となり前者の方がかなり大きいことがわかった。また、図 4 の塑性域を見ると、a) に比べ b) では掘削面隅角部及び掘削底部で塑性域の広がりが見られた。

(参考文献)

- 1) 山田 嘉昭: 塑性・粘塑性, 培風館, pp 76~pp 104

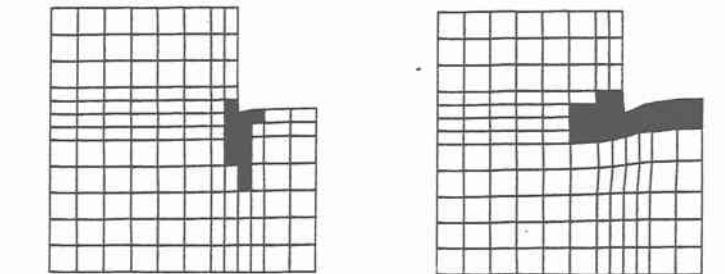
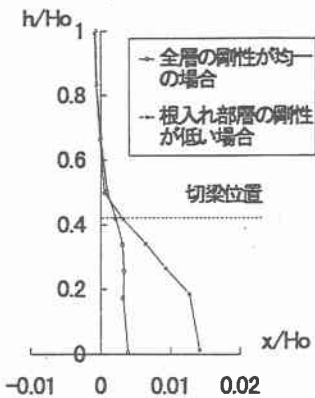
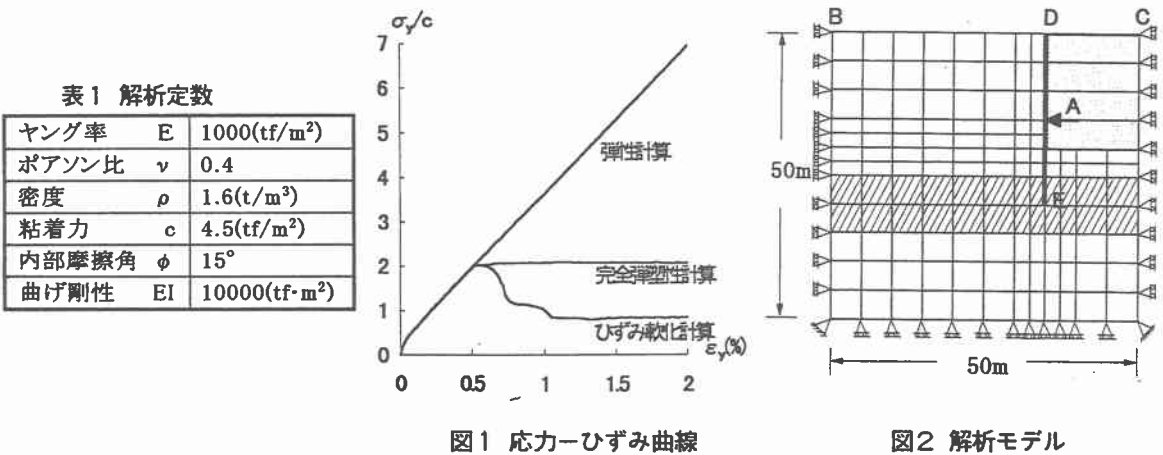


図 4 塑性域の進展図